

道路網における交通流配分の解析*

A STUDY ON TRAFFIC ASSIGNMENT TO STREET AND HIGHWAY SYSTEMS

加 藤 晃**
By Akira Kato

1. 緒 言

地域の経済発展の予測にしがたい、地域相互間の交通需要が推定できたときに、この需要がいかなる交通機関を利用して輸送を完了するかを分析することは交通施設計画にとって重要な課題である。この問題は多くの不確定要素を含むためその解決は容易ではないが、問題を解決するいとぐちさえ見つければ、地域開発の誘導的な手段としても大きな役割りを果たすものとする。

地域開発の予測や交通需要の推定においては、計画目標年度の産業の有効需要を尺度とすることが多く、この場合、地域間相互の貨客の輸送条件は需要を十分に満たすものとして解析を進めるのが普通であり、輸送のどのあい路も先行的な公共投資により打破されるものとしている。しかし実際にはすべての輸送施設を十分整備することは建設投資の効果からみて得策ではなく、その地域の有効需要を支えるのに最も効果の大きい輸送経路への集中投資が望ましい。この見地から交通需要がどの経路でどれだけ輸送されるかを分析することが重要な課題である。この報告は、交通需要の量と形態が推測できたときに、計画交通網の各区間にどれだけ輸送負担量が生ずるかをあらかじめ分析しようとするもので、現存する交通網に新しく路線が設置される場合、その交通路にどれだけ輸送量が生じ、在来の交通路線の輸送負担量がどんな影響を受けるかを解析するもので、交通計画の基礎分析として欠くことのできないものである。この解析を交通配分の解析と称することにし、この報告では主として道路網計画における交通配分について基礎的な理論と実際の道路網における適用手段として、電子計算機による解析手順について述べる。

この交通配分解析は道路網計画における適用だけに止まらず、地域計画・国土計画における交通施設計画の検討にも、また都市の交通計画における機関別分担輸送量予測の解析にも応用できるものである。

交通配分の解析理論は大別して3つの方法が考えられる。その第1は、リニヤール・プログラミング理論を応用する方法であり¹⁾、第2の方法は競合路線を先決して連

立方程式により解析を進めるものである²⁾。また第3はネットワーク理論を交通解析に導入して、この論理構成を道路網に応用してネットワーク内の流れをシミュレーションによって解決するものである。

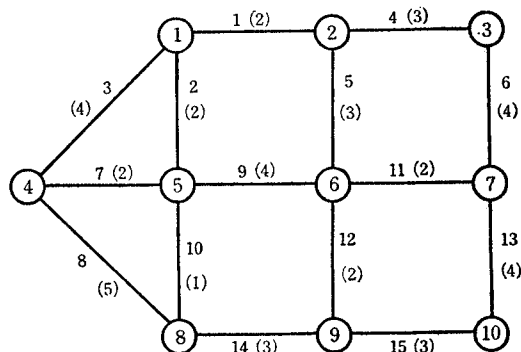
この3方法にはそれぞれ得失があって、一概にどの方法がよいと断定することはできないが、ネットワーク・シミュレーションによるものは適当な電子計算機を利用するならば、種々の制約条件を加味して適用範囲の広い解析方法となる。この報告はネットワーク理論の交通解析への導入から始まって経路探索、競合路線間の交通分担など交通流配分のネットワーク・シミュレーションの方法論を述べたものである。

2. ネットワーク理論による交通配分解析

ネットワーク・シミュレーションによる交通解析は、電子計算機の論理回路をシミュレーターに使うて計算機内に模型的に道路網を構成し、そこに交通量を与えて解析が進められる。これには基礎概念として道路網の定義、経路探索の論理を確立しておく必要がある。この基礎概念としては Ford らが提唱しているネットワーク理論³⁾の基礎的な考えかたを導入した道路網の定義と経路探索の解析方法を述べる。

まず、図-1のような道路網が与えられたとする。この道路網を点（以下ノードと称する）と、ノードとノードを結ぶ線（以下リンクと称する）の集合として考える。ノードは道路網を構成する交差点および OD 交通量の発着地の代表点と考えればよく、リンクは交差点間を結ぶ道路の区間に対応するものと考えればよい。

図-1 道路網模型図



* 昭和 40 年度土木学会中部支部研究発表会および昭和 40 年度日本 OR 学会春季研究発表会にて一部発表

** 正会員 岐阜大学助教授 工学部土木工学教室

いまリンクを S で表わし、これに方向性を考慮するとき、その始点ノードを $I(S)$ とし、他の端点であるノードを $J(S)$ とする。また各リンク S にはリンク評価値 $E(S)$ をつける。これをノードによって表わすとすれば $E(I, J)$ と書くことができる。

図-1 において○印はノードを示し、数字はリンク番号を、() 内の数字は評価値を示したものである。

したがって、解析対象道路網が決まった場合、この道路網をリンクとノードの集合で構成されるネットワークと考えて、リンクとノードのおおのにおに付番する。リンク S の集合を \mathcal{S} 、ノード I, J の集合を \mathcal{I} とすれば、道路網 L が与えられたときそれはただちに $L = \{\mathcal{S}, \mathcal{I}\}$ として表現される。

(1) 定義

いま道路網 L に属する任意の2つのノード I_0, I_d をそれぞれ出発点、目的点とする経路 $Q_k(I_0, I_d)$ をつぎのように定義する。リンク $S_i (i=1, 2, \dots, q)$ とノード $I_i (i=1, 2, \dots, q-1)$ の集合があって、これらの集合が式(1)を満足させるとき、

$$\left. \begin{aligned} I(S_1) &= I_0, \quad J(S_i) = I(S_{i+1}) = I_i \quad (i=1, 2, \dots, q-1) \\ J(S_q) &= I_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

S_i, I_i の集合を経路と定義する。経路は式(2)とも表わせる。 I_0, I_d 間の経路は1本と限らないので下添字 k によって区別する。

$$Q_k(I_0, I_d) = \{S_i, I_i\} \dots\dots\dots(2)$$

また I_0, I_d 間のすべての経路の集合を $Q(I_0, I_d)$ と書けば式(3)のように表現できる。

$$Q(I_0, I_d) = \{Q_k(I_0, I_d) | k=1, 2, \dots, n\} \dots\dots(3)$$

経路 $Q_k(I_0, I_d)$ は必ず経路評価値 $E(Q_k)$ をもち、これは式(4)のようにリンク評価値より求められる。

$$E(Q_k(I_0, I_d)) = \sum_{S \in Q_k} E(S) \dots\dots\dots(4)$$

このとき、最小の経路評価値 E_1 をもつ経路 Q_k を第1経路(最適経路)とすれば、式(5)によって計算される。

$$E_1(I_0, I_d) = \min_{Q_k \in Q} E(Q_k(I_0, I_d)) \dots\dots\dots(5)$$

なお式(5)の条件を満たす経路が2本以上存在するときには(これは同値の E_1 を持つときに生ずる)いずれか一方をとるものとする。

いま $Q_k = R_1(I_0, I_d)$ と書くことにする。さらに定式化の便宜上 $U_2 = \{R_1\}$ とおくことにすれば、第2経路は経路評価値として式(6)を持つ経路 Q_k であって、

$$E_2(I_0, I_d) = \min_{Q_k \in Q - U_2} E(Q_k(I_0, I_d)) \dots\dots\dots(6)$$

$Q_k' = R_2(I_0, I_d)$ とする。一般に、第 n 位の経路は U_n を式(7)と表わせれば式(8)の経路評価値

$$U_n \{R_i | i=1, 2, \dots, n-1\} \dots\dots\dots(7)$$

$$E_n(I_0, I_d) = \min_{Q_k \in Q - U_n} E(Q_k(I_0, I_d)) \dots\dots\dots(8)$$

を持つ経路 Q_k として求まる。ここで $Q_k(I_0, I_d) = R_n(I_0, I_d)$ とあらわすことにする。2つのノード間の経路が定義されたが、この経路をたどるために、先行ノードを定義しておく。すなわち、1つの経路 $R_k(I_0, I_d)$ をとり、式(9)の関係が成立する状態で

$$J(S_i) = I_i \in R_k(I_0, I_d) \dots\dots\dots(9)$$

式(10)の条件

$$I(S_i) = I_{i-1} \in R_k(I_0, I_d) \dots\dots\dots(10)$$

を満足する I_{i-1} を I_i の先行ノードといい、 $F(I_i) = I_{i-1}$ とあらわす。

一方、 L と同じ要素を持つ集合 L^1, L^2, \dots, L^n を定義し、これらをそれぞれ第1, 2, \dots, n 探索面という。これらの集合はつぎのような意味を持つ。

いま、道路網中の任意の出発点ノード I_0 を固定し、 I_0 を除くすべてのノード I_i にいたる第1経路 $R_{1i}(I_0, I_i)$ の要素 I_k, S_k は第1探索面 L^1 に属するとし、後述する I_k, S_k と区別するために、 I_k^1, S_k^1 と書くことにする。また $R_{1i}(I_0, I_d), R_{2i}(I_0, I_d)$ において $R_{2i}(I_0, I_i)$ の先行ノードを、

$$F(I_i) = I_{i-1}, \quad F(I_{i-1}) = I_{i-2} \dots\dots$$

と順次さかのぼり、はじめて式(11)が成立しかつ式(12)を満足するとき、

$$I_j \in R_{1i}(I_0, I_i) \cap R_{2i}(I_0, I_i) \dots\dots\dots(11)$$

$$\left. \begin{aligned} F(I_j) &\notin R_{1i}(I_0, I_i) \\ F(I_j) &\in R_{2i}(I_0, I_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

$F(I_j), I_j$ を端点とするリンク S_j を分岐といい、 I_j から I_i にいたるノード I_k 、リンク S_k を改めて I_k^2, S_k^2 と書き、これらを要素とする経路を $R_{2i}^*(I_0, I_i)$ とあらわす。このとき、任意の $I_k^2 \in R_{2i}^*(I_0, I_i), S_k^2 \in R_{2i}^*(I_0, I_i)$ は第2探索面 L^2 に属すると定義する。さらにまた、 $R_{3i}(I_0, I_i)$ の先行ノードを前と同じように

$$F(I_i) = I_{i-1}, \quad F(I_{i-1}) = I_{i-2} \dots\dots$$

とさかのぼり、はじめて式(11')が成立しかつ式(12')を満足するとき

$$I_j \in R_{1i}(I_0, I_i) \cap R_{2i}(I_0, I_i) \cap R_{3i}(I_0, I_i) \dots\dots(11')$$

$$\left. \begin{aligned} F(I_j) &\notin R_{1i}(I_0, I_i) \cup R_{2i}(I_0, I_i) \\ F(I_j) &\in R_{3i}(I_0, I_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12')$$

I_j から I_i にいたるノード I_k, S_k を I_k^3, S_k^3 と書き、これらを要素とする経路を $R_{3i}^*(I_0, I_i)$ とあらわし、同時に I_k^3, S_k^3 は第3探索面 L^3 に属すると定義する。同様に $I_k^n, S_k^n \in L^n$ を定義することができる。

(2) 解析

a) 道路網 L に属するノード I_0 を固定して、ほかのすべてのノード I_i への第1経路 $R_{1i}(I_0, I_i)$ の集合を \mathcal{X}_1 とするとき、 \mathcal{X}_1 をミニマム・ツリーという。このミニマム・ツリーは絶対に接合しない。すなわち、任意の $I_j \in R_{1i}$ をとれば $F(I_j)$ はただ一つ定まる。したが

って第1経路は各 OD 交通の経路 $Q_k(I_0, I_d)$ ごとにただ1本のみが求まる。

b) 第 k 経路 $R_{ki}(I_0, I_i)$ の集合を \mathcal{R}_k とする。任意の $\mathcal{R}_k, \mathcal{R}_l$ に属する経路 $R_{ki}(I_0, I_i)$ よび $R_{lj}(I_0, I_j)$ は接合しない。

c) I_0, I_d を固定し、任意の $I_i \in R_{kd}(I_0, I_d)$ をとるとき、式 (13) の関係があつて

$$I_{i-1} = F(I_i) \in R_{kd}(I_0, I_d) \dots \dots \dots (13)$$

この I_i, I_{i-1} に関して、式 (14) が成立するならば

$$E(R_{li}(I_0, I_i)) \geq E(R_{li-1}(I_0, I_{i-1})) \dots \dots \dots (14)$$

$R_{kd}(I_0, I_d)$ は接合しない。

3. 計 算 法

n 経路探索は、各探索面 L^k のノード I_i^k に対して、ラベル $[\text{sgn}, E_k(I_0, I_i), F_k(I_i), k]$ をつけて行なうことにする。ここに sgn は符号の意味である。

(1) まず各探索面 L^k のすべてのノード I_i^k にラベル $[+, \infty, \Delta, k]$ をつける。△印の部分は空白のことである。

(2) 第1探索面 L^1 のノード I_0^1 にラベル $[-, 0, \Delta, 1]$ をつける。他の探索面 L^k のノード I_0^k には $[+, 0, \Delta, k]$ をつける。

(3) ラベル $[-, E_k(I_0, I_i), E_k(I_i), k']$ のように符号部分がマイナスのラベルを持つ第 k 探索面 L^k のノード I_i^k をとり、 I_i^k を始点とするすべてのリンク S_j を探し、ノード $J(S_j) = I_j^k$ についてつぎのラベリングを行なう。

$$E(R_l(I_0, I_j)) \geq E(R_l(I_0, I_i)) \text{ の状態}$$

(a) $E_k(I_0, I_j) > E_k(I_0, I_i) + E(S_j)$ ならば

$$E_{k+1}^*(I_0, I_j) = E_k(I_0, I_i) + E(S_j)$$

$$F_{k+1}^*(I_j) = I_i, \quad k+1 = k$$

として、ノード I_j^k にラベル $[-, E_{k+1}^*(I_0, I_j), F_{k+1}^*(I_j), k+1]$ をつけ、さらに I_j^k のもとのラベルを I_j^{k+1} に、 I_j^{k+1} のもとのラベルを I_j^{k+2} に、……と順次つけていく。

(b) $E_k(I_0, I_j) \leq E_k(I_0, I_i) + E(S_j)$ ならば、ノード I_j^k にはラベルづけを行なわない。

(c) つぎに (b) のとき、

$$E_{k+1}(I_0, I_j) > E_k(I_0, I_i) + E(S_j) \text{ ならば}$$

$$E_{k+1}^*(I_0, I_j) = E_k(I_0, I_i) + E(S_j)$$

$$F_{k+1}^*(I_j) = I_i, \quad (k+1)^* = k \text{ として、}$$

(a) のようにラベルづけを行なう。そうでないときには $k+1$ を $k+2$ として、いずれかの探索面の I_j にラベルづけが行なえるまでつづける。

(4) このようにして I_i を先行ノードとするすべての I_j にラベルづけがすんだとき、 I_i^k のラベルの符号部分をプラスにして (3) をくり返す。

(5) すべての探索面のノードのラベルの符号がプラスになったとき、 I_0 を出発点とする経路探索が終了した

ことになる。

すなわち、第 k 探索面 L^k のノード I_i^k をとれば、 I_0, I_i 間の第 k 経路 $R_{ki}(I_0, I_i)$ はつぎのようになってわかる。 I_i^k よりはじめて、ラベルの k 部分が k ならば同じ第 k 探索面 L^k の $F_k(I_i) = I_{i-1}^k$ をとり、 k 部分が $l (< k)$ ならば (I_i^k は分岐の終点である) 第 l 探索面のノード $F_l(I_i) = I_{i-1}^l$ をとる。これをくり返して、最後に第1探索面 L^1 の I_0 に達することができる。

計 算 例

模型としてノード数 33、リンク数 60 の、図-2 のような道路網を考える。また、このリンク評価値は表-1 のように与えられるものとする。

このとき、ノード 15 を出発点として前述の計算を行

図-2 道路網の模型

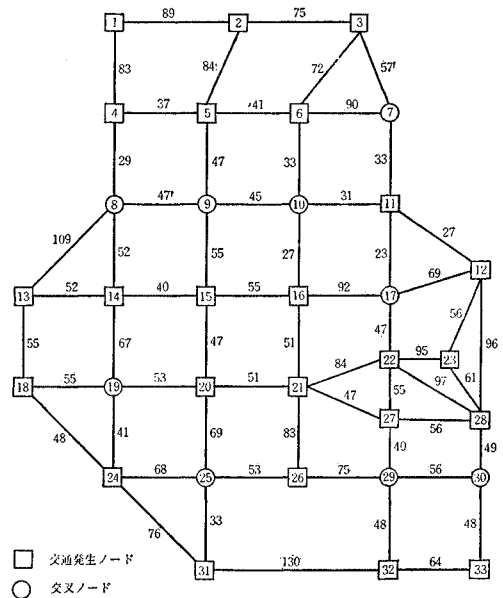


表-1 リンク評価値 (単位: 分)

始点	終点	リンク評価値	始点	終点	リンク評価値	始点	終点	リンク評価値		
01	02	8.9	11	12	2.7	21	22	8.4		
	04	8.3		17	2.3		26	8.3		
02	03	7.5	12	17	6.9		27	4.7		
	05	8.4		23	5.6	22	23	9.5		
03	06	7.2		28	9.6		27	5.5		
	07	5.7	13	14	5.2		28	9.7		
04	05	3.7		18	5.5	23	28	6.1		
	08	2.9	14	15	4.0	24	25	6.8		
05	06	4.1		19	6.7		31	7.6		
	09	4.7	15	16	5.5	25	26	5.3		
06	07	9.0		20	4.7		31	3.3		
	10	3.3	16	17	9.2	26	29	7.5		
07	11	3.3		21	5.1	27	28	5.6		
	09	4.7	17	22	4.7		29	4.0		
08	13	10.9		18	5.5	28	30	4.9		
	14	5.2		24	4.8	29	30	5.6		
09	10	4.5		19	20	5.3		32	4.4	
	15	5.5		24	4.1	30	33	4.8		
10	11	3.1		20	21	5.1		31	32	13.0
	16	2.7		25	6.9	32	33	6.4		

ばえな表-2のようにラベルづけされる。なお表中の第1項は起点ノードから終点ノードまでの評価値 $E_k(I_0)$,

表-2 11 経路探索のラベル表 出発点 15

節 点	探 索 面					
	1	2	3	4	5	6
1	204- 4-1	214- 4-2	222- 4-3	275- 2-1		
2	186- 5-1					
3	187- 6-1	203- 7-1	205- 6-2	215- 6-3	261- 2-1	262- 7-2
4	121- 8-1	131- 8-2	139- 5-1			
5	102- 9-1					
6	115-10-1	133-10-2	143- 5-1			
7	146-11-1	202- 6-1				
8	92-14-1	102- 9-1				
9	55-15-1					
10	82-16-1	100- 9-1				
11	113-10-1					
12	140-11-1					
13	92-14-1					
14	40-15-1					
15	0					
16	55-15-1					
17	136-11-1	147-16-1				
18	147-13-1	155-19-1	162-19-2	189-24-1	196-24-2	232-24-3
19	100-20-1	107-14-1				
20	47-15-1					
21	98-20-1	106-16-1				
22	182-21-1	183-17-1	190-21-2	194-17-2	200-27-1	208-27-2
23	196-12-1					
24	141-19-1	148-19-2	184-25-1			
25	116-20-1					
26	169-25-1	181-21-1	189-21-2			
27	145-21-1	153-21-2				
28	207-27-1	209-27-2	236-12-1	257-23-1	279-22-1	280-22-2
29	185-27-1	193-27-1	244-26-1	256-26-2	264-26-3	
30	241-29-1	249-29-2	250-28-1	258-28-2	285-28-3	300-29-4
31	149-25-1					
32	233-29-1	241-29-2	279-31-1	292-29-3	304-29-4	312-29-5
33	289-30-1	297-30-2	297-32-1	298-30-3	305-32-2	306-30-4

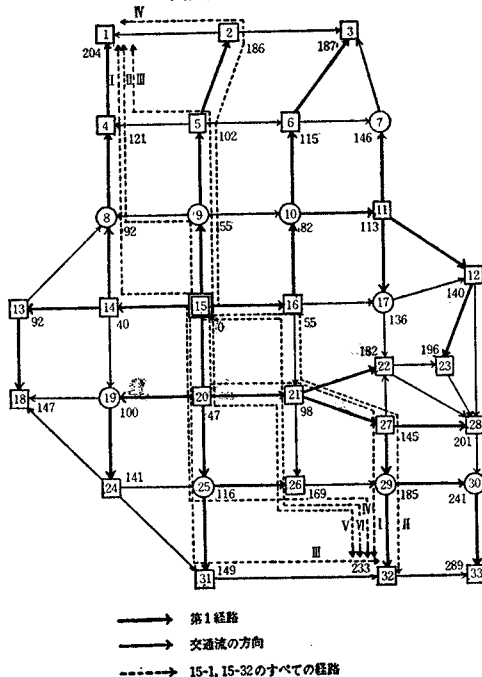
節 点	探 索 面					
	7	8	9	10	11	12
28	287-22-3	291-22-4	297-22-5			
30	306-28-4	312-29-4	320-29-5	328-28-5	329-28-6	336-28-7
33	333-30-5	243-32-3	248-30-6	354-30-7	356-32-4	360-30-8

節 点	探 索 面					
	13	14	15	16	17	18
33	368-30-9	368-32-5	376-30-10	376-32-6	377-30-11	384-30-12

表-3 経路表 (15→1, 15→32)

目的点	経 路	経路評価値
1	15-14-8-4-1	20.4
	15- 9-8-4-1	21.4
	15- 9-5-4-1	22.2
	15- 9-5-2-1	27.5
32	15-20-21-27-29-32	23.3
	15-16-21-27-29-32	24.1
	15-20-25-31-32	27.9
	15-20-25-26-29-32	29.2
	15-20-21-26-29-32	30.4
	15-16-21-26-29-32	31.2

図-3 出発点 15 の交通流の方向



I_d) を示し、第2項は先行ノード番号を、第3項は先行ノードが属する探索平面を示している。

したがって、この場合の交通流の方向は図-3のようになる。図中の算用数字はノード到達点までの評価値を示し、アラビア数字は経路順位を示したものである。また目的点 1, 32 の経路表を表-3に示した。

4. 道路評価値

前節までに用いたリンク評価値 (E) は、道路交通配分解析の基礎となる尺度であり、この評価値によって経路選択、交通分散のシミュレーションが行なわれるから、実際の交通が経路選択を行なう場合に判断尺度とする要因を忠実に表わすものでなければならない。運転者が経路を選択する理由は、その経路が運転者にとって魅力的であり、快適で通りやすい道路であると考える。おそらく、道路を走行するに要する時間・経費・快適度などを総合して判断するであろう。そこで、シミュレーションで経路選択を行なわせるためにこれらの要因に具体的な数値を与え、この値で道路の通り易さを表わす。この値を道路評価値と呼び、道路網を構成する各リンクごとに評価値の関数を決定しておき、シミュレーションの進行にともない随時計算によって評価値を求め、経路選択の尺度とする。ここで、評価値を直接所要時間・走行経費・快適度で表わす方法と、これらを決定する道路構造上の諸要素、すなわち、道路延長・幅員・舗装の程度・勾配・曲線半径の大小と数・交差点の密度などにより示す方法が考えられる。どちらの方法でもよいが後で述べる道路の混雑度や種別・規格による相違が、評

価値に数量的に包含できるものでないと、混雑度による走行条件の悪化を表現することが実際上不可能となる。このことを考慮して、ここでは評価値を所要時間と走行経費・走行快適度で表現し、道路上の諸条件を織り込む方式をとった。したがって、評価値関数 $E(S)$ は式(13)で表わされる。

$$E(S) = f(T_S) + g(C_{0S}) + h(A_S) \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 T は所要時間、 C_0 は通行料金を含めた走行経費、 A は快適度を数量表示したものである。所要時間 T は、走行速度 V に逆比例するので式(14)のようにおくことができる。 L は走行距離を示す。

$$f(T) = L/V \dots\dots\dots(14)$$

経費 C_0 は走行距離に直接関係する項目のみをとり上げて評価するのが妥当である。すなわち、燃料費・油脂費・タイヤチューブ費・車両修理費と有料道路区間の通行料金を考えればよく、車両償却費・人件費は固定費と考えて $g(C_0)$ には含めない。このように考えると、燃料費・油脂費は速度の関数であり、タイヤチューブ費と車両修理費は速度に無関係な値であって、一般に式(15)の多項式で表現できる⁴⁾。

$$g(C_0) = \{aV^2 + bV + C + d/V\}L \dots\dots\dots(15)$$

式(15)は自動車の走行性能曲線より求められるものであり、つぎの過程から算出される。

車の速度は、変速ギヤごとにエンジン回転数と直線関係にある。また、燃料消費量はエンジン回転率とエンジン負荷率から決定される⁴⁾。エンジン回転率は変速ギヤごとに速度の1次関数として示されるので、エンジン回転率を媒介として負荷率ごとの燃料消費量が算出できる。したがって、ギヤ別の速度変化に対する燃料消費量は、エンジン負荷率が定まれば決定できる。ここで求めた値に燃料単価を乗じて燃料消費額を決定できる。

車の走行に対するエンジン負荷率を、つぎのように仮定すれば、任意の走行状態のときの燃料消費量を算出できる。すなわち、 n 番目のギヤでの走行は $(n-1)$ 番目ギヤによる 80% 負荷率で走行して n 番目ギヤに対する十分な速度になってから、ギヤ変換を行なうものとし、最高ギヤでは任意の速度まで加速するときは負荷率 80% とし、こののち負荷率は 50% とする。このような仮定によると、街路交通のように交差点密度が大きい場所では燃料消費量が高くなり、道路が混雑して交通停滞がしばしば生ずるときには、それだけ燃料消費量が大きくなる。以上の仮定にもとづいて、現在市販されている国産車のエンジン性能から、乗用車・大型ディーゼルトラックの各ギヤにおける速度別燃料費を計算すると表-4 のようである。

表-4 の値を使用して、車の燃料消費量を速度の連続関数として表現するために、各車種ごとにその道路の条件に適した範囲内で代表速度を数点とり、最小自乗法で

表-4 ギヤ別・速度別燃料消費量 (乗用車)

ギヤ	速度 (km)	エンジン回転率 (rpm)	エンジン負荷率 (%)	燃料消費係数 (l/km)	所定速度までの燃料消費量 (l)	距離当りの燃料消費量 (l/km)	燃料費 (円/km)
2	10	630	14.1	0.113	0.0559	0.116	5.20
	20	1270	28.2	0.100	0.0495	0.103	4.63
	30	1900	42.3	0.123	0.0609	0.126	5.65
	40	2540	56.3	0.155	0.0767	0.157	7.07
3	30	1150	25.6	0.063	0.0299	0.071	3.22
	40	1540	34.2	0.065	0.0309	0.073	3.31
	50	1920	42.7	0.075	0.0359	0.083	3.76
	60	2310	51.3	0.086	0.0412	0.094	4.24

(大型トラック)

3	15	1245	47.9	0.163	0.0774	0.182	5.45
	20	1660	63.9	0.210	0.0998	0.226	6.79
	25	2080	79.9	0.266	0.1260	0.279	8.39
	30	2490	95.8	0.323	0.1530	0.334	10.01
4	25	1360	52.3	0.116	0.0505	0.149	4.48
	30	1630	62.7	0.137	0.0596	0.168	5.03
	35	1910	73.5	0.160	0.0696	0.188	5.63
	40	2170	83.5	0.180	0.0783	0.205	6.15
5	30	1040	40.0	0.065	0.0251	0.116	3.47
	40	1390	53.3	0.073	0.0288	0.123	3.69
	50	1730	66.7	0.092	0.0354	0.136	4.09
	60	2080	80.0	0.112	0.0430	0.152	4.55

表-5 燃料消費量の係数

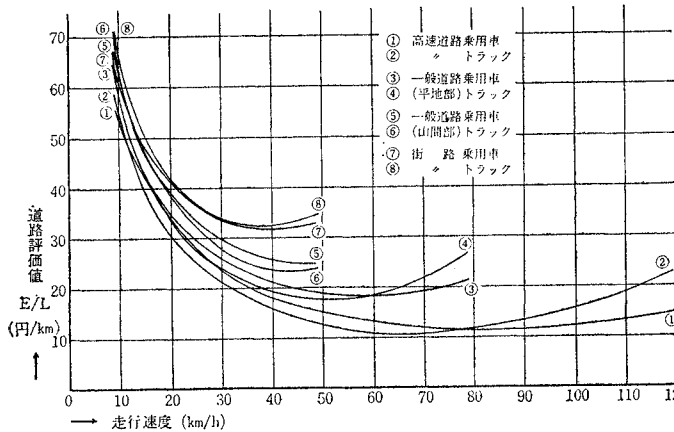
道路の種類	車種	a	b	c	d
高速道路	乗用車	0.00166	-0.211	12.56	29.8
	トラック類	0.00326	-0.335	11.93	274.9
一般道路平地部	乗用車	0.00525	-0.470	19.73	49.5
	トラック類	0.00854	-0.673	19.40	305.7
一般道路山地部	乗用車	0.00975	-0.542	26.75	16.0
	トラック類	0.01710	-0.936	30.38	257.6
街路	乗用車	0.00845	-0.651	26.83	29.4
	トラック類	0.01755	-1.310	37.07	219.6

式(15)の係数 $a \cdot b \cdot c \cdot d$ を決定する。いま、高速道路では中間停止点はないものとし、一般道路平地部では1箇所/kmの停止点を、街路部では2箇所/kmの停止点を考えて燃料消費量を算出し、係数 $a \cdot b \cdot c \cdot d$ を表示すれば表-5 のようになる。ただしこの計算に使用したガソリン・軽油の単価は、それぞれ 45 円/l、30 円/l である。またトラック類の構成を大型車 20%、小型車 80% としてある。

一般道路山地部の計算には、平均勾配の 4% 坂道が上り下り半々に存在するものと仮定して、ギヤごとの負荷率を変化させて計算してある。このほかに有料道路の場合では距離 1 km 当りの単位通行料金を加算する必要がある。通行料金の加算は、単位距離当りの料金率を使用するときは単純に加算すればよいが、距離に関係なく固定した料金を徴収する場合には、料金徴収所に相当するところへ仮空のノードをおいて、仮空ノードを通過するとき、

$$G(C_0) = P$$

図-4 道路規格別車種別・走行速度評価値の関係



だけを経費評価値に折り込めばよい。この方法は、都市高速道路の解析に使うて非常に有効であり、一般に街路から高速道路への上りのランプで P だけを加算し、下りランプでは $P=0$ とおけば固定料金徴収のシミュレートができる。

走行快適度を左右する要素としては、走行速度・道路の状態・沿道の環境・景観などが含まれ、しかも車種ごとの評価差・運転者の個人差がいちじるしいので一定の基準で算出することは困難である。また、走行費用と所要時間は距離の単調増加関数と見なせるが、快適度はこれと同じには考えられないので、観光的性格が少ない道路では快適度を省略して評価値を作成すれば、より実的である。しかし、観光やドライブを目的とする乗用車では相当大きな要因となるので、高速道路や快適性を強調する路線・有料道路などでは、この項を加味して評価値を算出する。

ここで道路評価値に関係のある主要因が明らかとなったが、 E の値を統一する必要がある。このためには、式(15)を式(16)のように変換して用いられたい。

$$E = \tau T + C_0 + \alpha A \dots \dots \dots (16)$$

ここで τ は時間価値率、 α は快適性価値率である。式(16)を L で除して単位距離当りの関数形に直しておくと、道路網を構成する各区分ごとに道路の規格と区分距離とから経路探索のときに随時計算される。このとき式(13)は、式(14)~(16)を用いて式(17)のようにおいておくと便利である。

$$E/L = \tau(1/V) + aV^2 + bV + c + d/V + P/L + \alpha A \dots \dots \dots (17)$$

図-4 は式(17)の6~7項を省略して、表-5にもとづいて評価値を道路規格別・車種別に計算したものである。 τ の値としては乗用車 7.05, 大型トラック 6.34, 小型トラック 3.17 (円/分)を用いてある。

5. 交通配分シミュレーションの基本的な考えかた

交通配分解析をシミュレーションとして行なう場合にも、一般のシミュレーションと同じように、問題の設定・資料の集取整理・解析手順の確立・シミュレーター作成の手順で構成される。すなわち、問題は対象道路網に OD 交通が与えられたとき、道路網を構成している各道路区間がどれほどの交通を分担するかを解析することである。このとき資料として入手できるのは OD 交通の推定値であり、対象道路網の諸条件である。解析手順としては、

- (i) OD 交通ごとに最適経路およびその競合路線を n 位まで選ぶ
- (ii) 競合路線間に分担すべき交通量を配分する
- (iii) 区間交通量を算出する
- (iv) 道路容量を越えたときの処置をとる

が考えられる。シミュレーターの作成は、電子計算機の論理回路を利用して計算的にシミュレーションを行なうので作成しなくてもよいが、いかなる方法でシミュレートさせるかという技法、すなわち解析論理とプログラムが問題の解を握るかぎとなる。このシミュレーションの解析論理の基礎となるのは、2. で述べたネットワーク理論による経路探索の定義である。すなわち、式(1)~(8)で定義される経路間の優劣勝負のくり返しを計算で行ない、経路選択の順位を決定する。このときの優劣の決定要因となるものは評価値関数 $E(S)$ である。

経路探索の定義により1位から n 位までの経路が探索されただけでは、道路網を構成している各区分が、実際に負担するであろうと思われる交通量の推定や配分交通量と道路幅員のバランス、幹線道路とバイパスの競合、特定区間の幅員狭小によって生ずる混雑状態とそれに起因する交通流の変化、一般道路から高速道路への交通の転換、高速道路・都市高速道路におけるインターチェンジやランプウェイの交通状態を分析することは不可能である。そこで特定区間の配分交通量が容量を越えるようであれば、その混みかたによって走行速度が落ち所要時間、走行経費が増加する状態を配分シミュレーションの中へ制約条件として繰り込ませ、最適経路と2位以下に評価された経路との間で交通を分担する割合の変化を解析し、さらに各経路内において交通混雑が生じている場合には、それによって生ずる回交交通の解析や経路変更の状態を明らかにする必要がある。

このためには競合路線間における交通分担率を計算し、それにしたがって1位から n 位までの経路に配分された交通量を集計して、道路各区分の配分交通量を算出

する。この作業が競合路線間における交通流の分散現象のシミュレーションになる。ついで、配分交通量が区間の交通容量を越えていないかを調べて、どの区間も越えていない場合には競合路線間の交通分散シミュレーションだけで配分解析は終了する。容量を越えている場合には、すでに求めた道路評価値（走行速度の関数）が道路の混雑によって変化するので、混雑度を考慮して新しい評価値のもとに改めて分担率を計算し配分交通量を算出する。この場合の解析を容量制約をともなった配分解析という。

6. 競合路線のある場合の配分解析

競合路線間で交通流を分担する解析の論点を大別すると、競合路線の定義と交通量分担率の算定にわけられる。競合路線とは、最適経路に対して交通を分担すると予想される2位以下の経路を指すが、最適経路と異なる経路の基準をどこにおくかが問題であり、解析の対象・規模の大きさ・解析の意図によって変化する。競合路線のとりかたとしてはつぎの3つの場合が考えられる⁷⁾。

- (i) 最適経路と1リンクでも構成が異なるもの。
 - (ii) 最適経路と2位, 3位の経路が大幅に異なるものをつぎの経路と考え、ごく局部的に経路変更をするものは考慮外におく。
 - (iii) 競合路線を全く別の道路網から選びだす。
- (iii) の場合は、高速道路の解析によく用いられる方法⁸⁾⁹⁾であるが、この方法は常に真の競合路線を探索しているとは限らない⁷⁾。

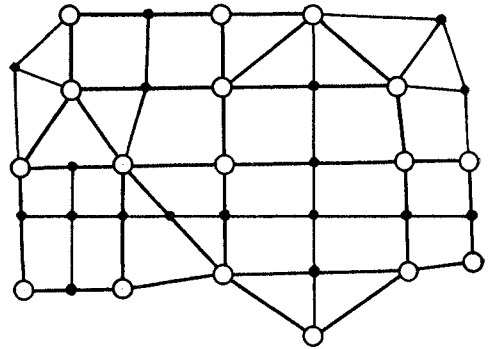
(i) の方法は式(1)~(8)で定義された経路に忠実なものであるが、道路網の構成とOD交通量のトリップ長がうまく均衡していないと、長距離交通ではごく一部の経路だけを回する2位経路が生じ、道路計画上必要とする競合路線をもった交通を知ることができない。

したがって、このシミュレーションでは(ii)の方法で競合路線を定義する。

(ii) の考えかたは、どんな広域な道路網にも稠密な街路網にでも適用できて、しかも最適経路、2位、3位の経路がかなり大幅に異なった状態で探索できるから、計画上は最も交通状態を現実に近いものにして、表現できる。しかし、この適用には2つの問題点がある。1つは2位以下の経路探索の方法であり、いま1つは大幅に異なった状態を計算機にどう指令するかという点である。

前者については、経路の探索平面を変えて探すことで解決される。すなわち、2. で述べた最適経路探索の論理は、あるノードを起点としたときに構成される経路は決して交わらないということであり、これはあるノードに達するのに最適経路は1本しか存在しないことを意味する。第2位経路の選択に関しても、これを拡大し各ノードに架空のノードをともなわせ、これを結ぶときは交

図-5 マクロ道路網の構成



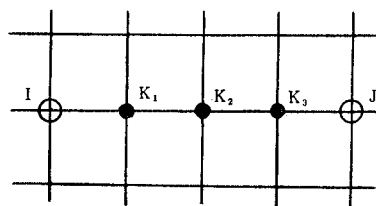
—— マクロ道路網
 ——— 一般道路網

差しないものとすればよい。この解析手順は3. で述べたラベリングを利用した探索平面の区別を導入して求められる。電子計算機のシミュレーションでは、3. の論理を計算機で行なわせればよい。なお、この場合の電子計算機による演算プログラムとメモリーの使いかたは「道路」に発表したので省略する⁷⁾。大幅に異なった経路を表現するには図-5のように解析対象にしている道路網を幹線で結んだマクロ道路網と基本道路網とに分けて兼ね合わせ、長距離交通や通過交通はマクロ道路網上で、最適経路および2位以下の経路探索を行なわせ、OD相互間があまり隔たっていない交通は普通の道路網で解析を行なえばよい。長距離交通は、多少評価値の差があっても最適経路・2位経路とも幹線の道路網で交通を流さないと局部的な回交通が競合路線となる。マクロ道路網の構成は、計画者の技術的な意見を取り入れることができるので、数県を一つの地方とした場合の道路網と単単位の道路網・市の街路網とでは、当然のことながら幹線の構成が異なってもよいわけである。

マクロリンクの構成の方法はつぎのようである。いま図-6のような道路網の一部をとりあげて、 $IK_1, K_1K_2, K_2K_3, K_3J$ のリンクで IJ 区間を一つのマクロリンクとすると、これを I^*J^* とすれば式(18)のように定義できる。マクロ道路網では*印のついているノードのみが交通流の交換ができると考えればよい。

$$I^*J^* = (IK_1) \cup (K_1K_2) \cup (K_2K_3) \cup (K_3J) \dots\dots\dots(18)$$

図-6 マクロリンクの一例



この構成は、計画者がマクロ・ネットワークとなる幹線道路網の構成を解析に先立ち決定しておけば、マクロ・ノードと、マクロ・リンクを式(19)、(20)のように定めて計算機の中に情報を送ることができる。

$$I^* = I(S_1), J^* = J(S_r) \dots \dots \dots (19)$$

$$I^* J^* = (I_0, K_1) \cup (K_1, K_2) \cup \dots \cup (K_{r-1}, J_r) \dots (20)$$

マクロリンクが定義できれば、2., 3. で述べたネットワーク理論とその計算方法が一般の道路網に適用できたのと同じようにマクロリンクで構成された道路網にもそのまま適用できて、マクロ道路網での経路探索が可能である。

交通分担率は、1組のOD交通量の中である経路に交通が分散して配分される割合をいい、交通流が数経路間に分散する現象を追求するのに重要な項目となる。交通分担率に類似したものとして転換率があり、これまでの交通配分解析では主として転換率を中心に論じられてきた¹⁰⁾。しかし、転換率は旧道路から新設の道路にどれほどの転換量があるかの算定方法であって、競合路線間の分担率とは若干異なるものである。すなわち、転換率は道路新設の場合の一時的な競合を論じ、分担率は定常時の競合関係を示すものと考えてよい。ここでは分担率を中心に競合路線間における交通配分解析を進めるが、分担率算出の考えかたと計算式の誘導については改めて発表する*ので今回は省略する。

7. 容量制約を伴った配分解析

交通配分のシミュレーションにおいて、容量制限を行なう場合には、解析対象とする道路網と交通量の間で式(21)、(22)の条件が成立して始めて容量制限を伴う解析の意義が生かされる。

$$\sum_{S \in \mathcal{J}} X_S \leq \sum_{S \in \mathcal{J}} C_S \dots \dots \dots (21)$$

$$\sum_{S \in \text{Cut } A} X_S \leq \sum_{S \in \text{Cut } A} C_S \dots \dots \dots (22)$$

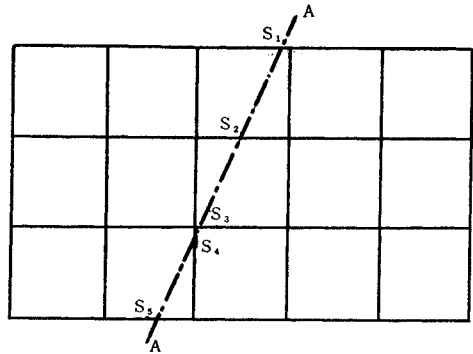
ここで X_S : リンク S に配分される交通量

C_S : リンク S の交通容量

Cut A : 道路網を任意の2つに分ける線

式(21)は、解析対象道路網における各区間の交通容量の総和は、必ず配分交通量の総和より大きくななければならないという条件であり、式(21)が満足されない場合は、対象道路網の容量の絶対量が不足しており、容量制限の意義は全く失われてくる。式(22)は、輸送あい路における容量と交通量の均衡条件を考えるときに生ずるものである。これが満足されない場合には、図-7に示すように道路網を任意の線で2つに分けた地域相互間の交通は、どの経路をたどるにしても容量不足の制約を受けるわけで、計画道路網と交通量との間に不均衡が生じたことを示し、交通利用者側はバイパスの建設や路線拡

図-7 道路網切断線



幅が行なわれない間は交通渋滞を強制される。

容量制限を伴った配分シミュレーションにおいて、配分交通量が競合路線間を往復し、一定の収束値を見いだせない場合の多くは、式(22)の条件を満足しない状態で容量制限の解析を行なうことに起因している。したがって、容量制限の解析に先立ち、式(22)が常に成立しているかを確認しなければならない。式(22)が満足される場合でも、極端なう回路に交通が流れることは非常に少ないので、どの経路も容量制約を受けた場合のう回路線とは限らない。このう回路線となりうる経路とその経路の分担交通量の決定は競合路線の解析で行なえる。すなわち、競合路線間の分散解析のときに、最適経路を基準にして一定値以上の評価値をとるう回路は、分担率を零としておけば、計画有望ましくない極端なう回路へ交通が流れることを解析上で除去できる。

つぎに容量制限を考えない場合の解析が、そのまま容量制限を行なった場合の解に等しくなることがある。これは道路網上のどのリンクの配分交通量も、各リンクの交通容量以下の場合に生ずる。この場合には、交通容量を制約条件としても制約条件は常に満足されており、制約条件がない場合の解析と同じ結果をうるからである。この場合の容量と配分交通量の関係を示せば式(23)のようである。

$$X_S \in \mathcal{J} \leq C_S \in \mathcal{J} \dots \dots \dots (23)$$

したがって、容量制限がある場合の配分解析は、式(21)、式(22)を満足し、しかも式(23)が成立しないときに意義を生ずる。式(23)の検討は、道路網を構成する全リンクについて行なう必要があるが、これは交通量配分の計算時に多少の操作を付加すれば、配分シミュレーションと同時に検討することができる。このため、希望配分交通(容量制約のない場合)の解析が先行して行なわれる場合には、式(23)は自動的に検討でき、式(23)が成立していれば、その解析結果が容量制限をともなったときの結果ともなる。なお、式(23)の検討方法としては X_S/C_S の計算を配分交通量算出と同時に計算させて検出するのがよい。 X_S/C_S が1.0を越えるり

* 一部の方法を「道路」に発表した。参考文献7) 参照

リンクが1個でもあれば、式(23)を満足しない。

容量制約のある場合の配分シミュレーションは、容量と配分交通量とから道路の混雑度を計算し、それによって道路評価値を変更する方法と、経路探索に際してOD交通に優先順位を先決して与えておき、その順位にしたがって経路探索を進め、経路が解析されたものから順次OD交通量を配分する方法とが考えられる。この両者にはそれぞれ得失があり、一方的にどちらがすぐれているとはいえないが、ここでは混雑度によって配分シミュレーションをフィードバックさせる方法を述べる。

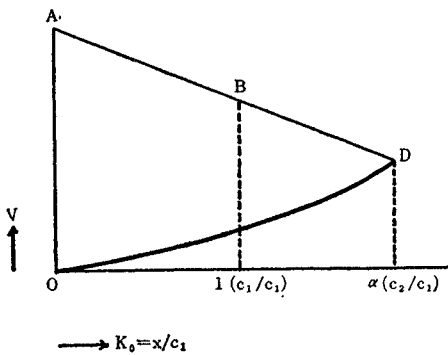
混雑度により容量制約を行なう方式は道路評価値が式(17)に示したように速度の多項式として表現されており、しかも図-4からもわかるように第1象限で最小値を有するように各係数が決定されるため、速度が低下した場合には $(\tau+d)/V$ の項が大きく響き、評価値は急速に増大する。評価値関数がいかなる走行速度に対しても整合性を有すると仮定すれば、この性質を利用して経路探索および交通分担率の修正をすることができる。すなわち、道路の混雑度が走行速度にどんな影響を与えているかを明らかにすれば、この解析は可能となる。いま、道路の混雑度 K_0 は式(24)に示すように、リンクの交通容量に対する配分交通量の比と定義する。ここで交通容量 $C(S)$ は、各リンクに対して定まった値であるから、混雑度は配分交通量によって支配される。

$$K_0(S) = \frac{X(S)}{C(S)} \dots\dots\dots(24)$$

換言すれば、道路網の基礎資料にリンクの容量が与えられているときは、配分交通量からただちに混雑度をうる。

道路の車線数が定まっているとき交通量と走行速度の関係は、交通量が可能容量に達するまでは、交通量の増加につれて車の走行速度は減少し、可能容量に達したのちは走行速度が減少しても交通量は増加せずに、速度の減少とともに交通量も減少すると報告されている^{11),12),13)}。この関係を利用して混雑度を評価値関数の中に導入すれば、可能容量までは交通量と速度が直線関係にあるものと考えてよい。この交通量を道路の容量で除した混雑度

図-8 走行速度と混雑度の関係



で置換して示せば式(25)のように表わせる。

$$V = aK_0 + b \dots\dots\dots(25)$$

式中の a, b は定数であり、走行速度と交通量の関係から求められる。図-8は、速度と混雑度の一般的関係を示したものである。図-8では解析の便宜上、混雑度の尺度としては実用容量(C_1)に等しい配分交通量を与えられたときを、混雑度1.0として、交通量が可能容量(C_2)に達したときの混雑度 α は、実用容量に対する可能容量の比 C_2/C_1 ($C_2 > C_1$)で与えられる。 C_1, C_2 は道路の幅員・車線数・線形・勾配などの道路条件や走行速度・車種構成などによっていちじるしく異なるので、道路網の各リンクの実状に相応した値を用いなければならない。また図-8のB点は実用容量を、D点は可能容量を示している。

混雑度を、リンク評価値に導入するときは、式(25)を式(17)に代入すると式(26)のように表現される。

$$E/L = a'K_0^2 + b'K_0 + c' + d'/K_0 + \tau'/K_0 + P_0 + \alpha A \dots\dots\dots(26)$$

式(26)は、混雑度 K_0 についての関数であり、リンク評価値が混雑度によって支配されることを示している。したがって、制約条件がない場合の希望配分交通量とリンクの実用容量とから、混雑度を導入した新しいリンク評価値を計算して、最適経路と競合路線間の交通分担率を変化させることができる。

この場合に注意すべき事項が3点ある。まず第1は、フィードバック制御を経路探索までさかのぼって行なうと、経路探索に混雑度を考慮した評価値が入り、OD交通の経路は混雑度をとり入れて探索できるように見える。しかし、実際の配分シミュレーションは、計算機容量からみて競合経路をただか数本選択できるだけで、普通は最適経路と競合経路1本の2路線の競合問題として解かれることが多い。このとき、最適経路や競合経路が経路探索のたびに変更されたのでは、容量制限本来の意味をなくするわけで、この方法で探索された経路は、混雑度を考慮して探索したものとは、本質的に異なるものとなる。したがって、この方法による配分交通量も意味をもたない。混雑度を考慮した経路探索は、始めから競合路線の数を評価値の分布が重複する限り取り上げ、その中で混雑度によって分担率だけを制御したものと考えるほうが妥当である。すなわち、2路線だけに競合路線を絞ったときは、ほかの経路に流れている交通はすべて2位経路までに配分されるので、1位2位経路だけが3位経路以下にくらべて、特にすぐれている場合は問題ないが、3位経路以下があまり変わらないときはかなりの誤差を含むわけで、この関係は多項式展開の近似式において第 n 項以下を省略する場合と全く同じである。

つぎに、前節までのシミュレーションでは、配分対象

となる交通量は日交通量でも、時間交通量でも成立した。しかし、混雑度を考慮した配分シミュレーションでは、混雑度のもつ性質が短い単位時間当りの交通量と交通容量の比であり、交通量の尺度としては30分交通量、1時間交通量などをとるのが望ましい。したがって日交通量を解析資料として混雑度による解析を行なうときは、1日を数個の時間帯に区分した上で配分解析を行なうのが本筋である。

第3に競合路線の数を n 本に制限して容量制限を行なうときには、配分対象経路に選ばれた n 本の経路間において、式(22)と同じ条件が成立しなければならない。これは式(27)、式(28)のように表わせる。

$$\sum_{S \in \text{Cut } A \cap R} X_S \leq \sum_{S \in \text{Cut } A \cap R} C_S \dots\dots\dots(27)$$

$$R = \{Q_k(I_0, I_d) | k=1, 2, \dots, n\} \dots\dots\dots(28)$$

式(27)が成立しない経路を通るOD交通は、制限容量を越えて配分されるので、このときの対策としては競合路線の数を増やして、式(27)が成立するように修正するか、式(27)が満足されないまま容量を越える交通量だけは、その経路に対する需要度が高いものとしてバイパス計画を立案するか、いずれかの方策をとらねばならない。

前者は、合理的な解決方法であるが現在の配分シミュレーションでは解析上困難な点が多すぎるため、後者のほうが実用的である。この場合、バイパスに移る交通量は計算過程では架空のリンクに配分される方式をとる。

む す び

交通配分解析を電子計算機で行なう方法は、1958年頃から始まっているが、これまでの方法のほとんどが最短経路探索法であって、競合路線を考慮されたものは少ないし、またネットワーク面の経路探索の論理と計算方法を明確に示したものが少なかったため、この点を明らかにすると同時にネットワット・シミュレーション全体の手順を明らかにするために本研究をまとめた。ただ、競合路線の分散解析で、最大の問題である交通分担率の考えかたと計算式誘導を別に発表することにしたの

で、交通量の分散解析が舌足らずに終わった点ご了承頂きたい。

この報告では、計算例としてごく簡単なもの以外は紹介できなかったが、かなり規模の大きい道路網についても計算を試みたので、十分実用的な方法であることを記しておく。なお、実際の計算プログラム、解析のブロックチャートについては参考文献7)を参照して頂きたい。この研究を行なうに当たり、FACOMの開発計算課長池上一志氏の多大なご助力を頂いたことを付記して深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 佐佐木綱：道路網における輸送計画について、第4回日本道路会議論文集、1957、p. 43.
- 2) 星野哲三：道路網における交通量配分の理論、I、II、道路、1963、4、5、p. 281、p. 377.
- 3) L.R. Ford and D.R. Fulkerson：Flows in Networks, Princeton University Press, 1962.
- 4) 平尾 取：自動車計画原論の試み、東京大学出版会、1963.
- 5) P.J. Claffey：Time and Fuel Consumption for Highway-User Benefit Studies, Public Roads, Vol. 31, No. 1, 1960, p. 22.
- 6) M. Whol：Simulation and its Application to Traffic Engineering, Part I, Traffic Engineering, Vol. 30, No. 11, No. 1960.
- 7) 加藤 晃：道路網計画における交通流解析の適用 I、II、道路、1964.9、10、p. 728、p. 875.
- 8) Glenn E. Blokke：Assigning Traffic to a Highway Network, Public Roads, Vol. 30, No. 10, Oct. 1959, p. 227.
- 9) C. Pinnell & G.T.Jr.Sallerly：Analytical Methods in Transportation Systems Analysis for Arterial Street Operation, Proc. of the American Society of Civil Engineers, Vol. 39, No. EM 6, 1963.
- 10) Glenn E. Brokke and W.L. Mertz：The Influence of New and Improved Roads on the Distribution of Traffic, Proc. of 4th International Study Week in Traffic Engineering, 1959.
- 11) B.D. Greenshields：The Density Factor in Traffic Flow, Traffic Engineering, March 1960.
- 12) U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads：Highway Capacity Manual Practical Applications of Research, 1950.
- 13) 星野哲三・大森 勇：交通量の走行速度に及ぼす影響について、第5回日本道路会議論文集、1959、p. 802

(1965.12.2・受付)